

- FICHE 1** ▶ Les principes de la relativité galiléenne
- FICHE 2** ▶ L'espace-temps galiléen
- FICHE 3** ▶ La contraction de Lorentz et la dilatation des durées
- FICHE 4** ▶ Les transformations de Lorentz
- FICHE 5** ▶ La géométrie de l'espace-temps
- FICHE 6** ▶ Les 4-tenseurs
- FICHE 7** ▶ L'électromagnétisme
- FICHE 8** ▶ La mécanique relativiste
- FICHE 9** ▶ L'impulsion-énergie

Lorsqu'en 1905 A. Einstein élabore la théorie de la relativité restreinte, il met fin à plusieurs décennies de crise au sein de la physique et rétablit une cohérence entre la mécanique et l'électromagnétisme. C'est essentiellement une théorie de l'espace-temps, dans laquelle les propriétés de l'espace et du temps divergent de celles qui régissent la vie ordinaire. En particulier, l'écoulement du temps devient dépendant du mouvement de celui qui le mesure<sup>1</sup>. Alors que la théorie électromagnétique de J.-C. Maxwell est en accord avec ces nouvelles conceptions, la mécanique classique de I. Newton doit être modifiée pour s'y conformer.

Le mot « relativité » fait référence au fait que les théories physiques ne parlent pas des objets en eux-mêmes, mais des résultats de leur observation au cours d'expériences scientifiques. Ainsi, toute loi physique implique à la fois un objet et un observateur, et le résultat d'une mesure sur un même objet ou un même phénomène peut changer selon l'observateur qui la réalise. Il est pour cela important de distinguer les grandeurs physiques qui donnent un résultat unique, elles sont dites « absolues », de celles dont la valeur change effectivement d'un observateur à l'autre, qui sont dites « relatives ».

A. Einstein a souligné l'importance de l'observateur dans la structure même de la physique théorique. Il a en effet été amené à modifier la répartition entre grandeurs absolues et relatives qui prévalait jusqu'en 1905, afin d'expliquer le fait stupéfiant, connu depuis la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, que la vitesse de la lumière ne dépend ni du mouvement de sa source, ni de celui de l'observateur. Avant lui, la taille des objets et la durée séparant deux événements étaient considérées comme absolues. Pour lui, elles deviennent relatives lorsque les vitesses des objets ou des observateurs approchent celle de la lumière.

Nous sommes donc en présence de deux relativités successives. La première, dite **relativité galiléenne**, qui coïncide avec notre perception quotidienne de l'espace et du temps, est en accord avec la mécanique classique et en désaccord avec l'électromagnétisme. La nouvelle, dite **relativité restreinte**, est l'objet de ce fascicule. Elle est en accord avec l'électromagnétisme et avec une mécanique modifiée. Elle retrouve cependant, lorsqu'elle est appliquée à des problèmes où les vitesses sont petites devant celle de la lumière, les mêmes résultats que ceux prévus par la relativité galiléenne et la mécanique classique.

---

1 Nous donnons un sens précis à ce phénomène dans la fiche 3.

Il y a 66 millions d'années, un astéroïde a percuté la surface de la Terre après avoir dessiné une ligne incandescente qui a traversé le ciel. L'impact de cet objet fut un événement sans précédent à l'origine de l'extinction des dinosaures. Un observateur extraterrestre, à la recherche de vie dans le cosmos, a observé la ligne et l'impact à l'aide de son télescope. Ces quelques mots suffisent à introduire certains des principaux concepts relativistes : événement, objet, lignes d'univers et observateurs, qui sont utiles aussi bien en relativité galiléenne (R.G.) qu'en relativité restreinte (R.R.).

## ■ Définitions

- Un **événement** est défini par l'énoncé suivant : « Quelque chose qui se passe à un moment et à un endroit donnés ». Il a donc à la fois un caractère localisé spatialement et temporellement. Sa durée et sa taille sont toutes deux nulles<sup>2</sup>. Songez, par exemple, à un battement de cœur.
- L'ensemble de tous les événements constitue l'**espace-temps**. C'est l'« arène » dans laquelle se déroulent tous les phénomènes physiques<sup>3</sup>. Comme il faut trois nombres pour repérer la position d'un événement dans l'espace, et un seul pour le repérer dans le temps, l'espace-temps a quatre dimensions.
- Un **objet** ponctuel est une entité de volume nul possédant une certaine durée de vie, possiblement infinie. Au cours de sa vie, l'objet est le siège d'une multitude d'événements. La suite continue de tous ces événements constitue sa **ligne d'univers**. Par exemple, la suite (presque) continue des battements de cœur qui ponctuent notre vie.
- En sa qualité d'observateur, l'astronome extraterrestre peut effectuer des mesures sur l'astéroïde, telles que sa masse, la position de son impact ou la durée de la ligne incandescente. Plus généralement, un **observateur** est un objet particulier équipé pour réaliser des mesures. Ces dernières permettent de connaître la valeur des **grandeurs physiques** qui caractérisent les propriétés d'un corps ou d'un processus. Chacune d'elles est obtenue par l'application d'un protocole de mesure spécifique<sup>4</sup>.

Chaque protocole doit être applicable par tous les observateurs. Les données numériques issues des appareils de mesure sont appelées **résultats de la mesure**. Des observateurs distincts appliquant le même protocole sur le même objet (ou processus) obtiennent en général des résultats différents<sup>5</sup>.

2 La collision de l'astéroïde n'est pas tout à fait un événement dans le sens du physicien, puisqu'elle dure un certain temps et se déroule sur toute la zone du cratère qu'elle crée. Vu d'assez loin, l'impact se produit cependant à un endroit précis, et il est quasiment instantané.

3 Dans le monde réel, il se passe partout et toujours quelque chose, de telle sorte que l'espace-temps coïncide avec l'univers tout entier, de son début à sa fin.

4 Certaines grandeurs physiques sont obtenues par le calcul à partir d'autres grandeurs physiques mesurées. Par exemple, l'énergie cinétique  $\frac{1}{2}mv^2$ .

5 Par exemple, le protocole de mesure de la vitesse d'une voiture se fait en utilisant un radar. Le même radar placé sur le bord de la route ou dans une voiture de police roulante ne donne pas le même résultat (voir application 3 – fiche 2).

## APPLICATION 1 – MESURES PAR RÈGLE ET MONTRE

La taille d'un objet est une grandeur physique, mesurée en le comparant à une règle étalon, identique pour tous les observateurs. La durée entre deux événements est une grandeur physique mesurée à l'aide d'une montre, identique pour tous les observateurs.

### ► Tailles et durées propres

- Un observateur muni d'une règle mesure sans ambiguïté la taille d'un objet rigide tant qu'il reste fixe par rapport à lui. Le résultat de cette mesure est appelé **taille propre** de l'objet. Un autre observateur, fixe par rapport à cet objet, applique le même protocole et appelle également taille propre le résultat obtenu. Trouvent-ils la même valeur ? La réponse est donnée par l'expérience : les deux résultats sont bien identiques. Cela conduit au premier principe de la R.G. :

### PRINCIPE N° 1 DE LA RELATIVITÉ GALILÉENNE

La taille propre est absolue.

- Un observateur muni d'une montre mesure sans ambiguïté la durée entre deux événements E1 et E2, tant qu'il est présent là où, et quand, chacun d'eux se produit. Il réalise ainsi une mesure de la **durée propre** entre E1 et E2. Un autre observateur passant aussi par E1 et E2, mais ne suivant pas le même chemin (fig. 1), mesure également une durée propre. Trouvent-ils le même résultat ? L'expérience indique que oui. Cela conduit au second principe de la R.G. :

### PRINCIPE N° 2 DE LA RELATIVITÉ GALILÉENNE

La durée propre est absolue.

## APPLICATION 2 – RENDEZ-VOUS

Des étudiants doivent prendre un train à 18 h (E2) pour rentrer chez eux après un cours se terminant à 16 h 30 (E1). Peu importe ce que fait chaque étudiant durant ce laps de temps, ils arrivent tous à l'heure à la gare pour prendre leur train. Cela s'explique par le fait que les durées propres indiquées par chacune de leurs montres sont identiques, ce qui leur permet d'arriver à la même heure, juste avant le départ du train.

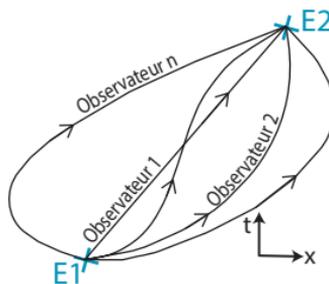


Figure 1 – Lignes d'univers d'observateurs passant par E1 et E2.